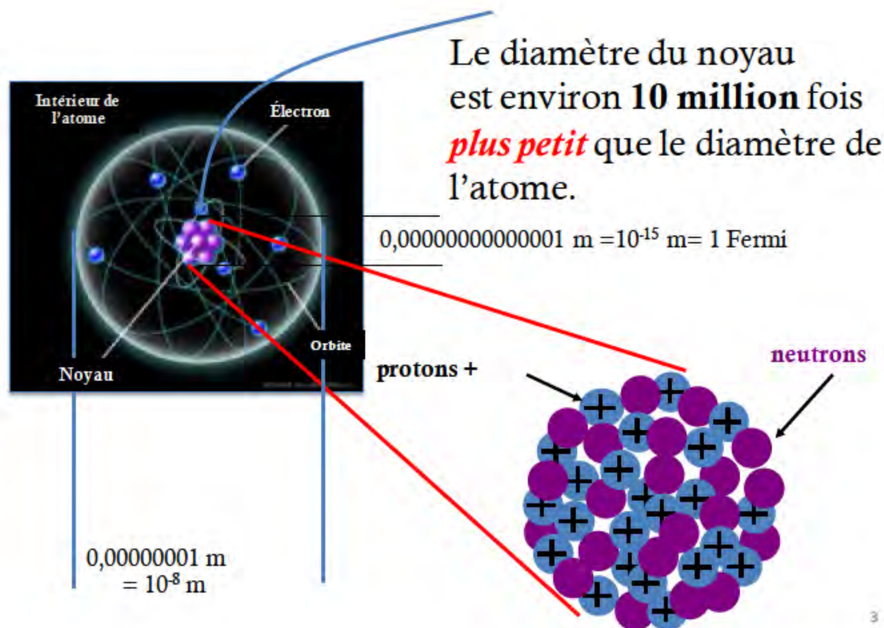
STRUCTURE DU NOYAU ET RADIOACTIVITÉ



Le rayon d'un noyau

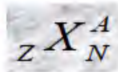
- L'analyse de Rutherford a permis d'établir que le noyau a un rayon voisin de **10^{-14} m**. Des expériences plus élaborées ont permises de démontrer qu'il existe un lien entre leur rayon *R* et le nombre de masse *A* :



- $R = 1{,}2\,A^{1/3}$ **fm**

1.1 Composition et structure du noyau: Le noyau d'un atome est composé de particules appelées nucléons (des neutrons électriquement neutres et des protons chargés positivement) **extrêmement** liées. Sa cohésion est assurée par l'interaction forte, force principale dans le noyau, qui maintient les nucléons ensemble et les empêche de s'éloigner les uns des autres (force de répulsion électrique).

1.1.1. Particules constituant un noyau stable.



Proton: découvert par Goldstein en 1887.
Masse: 1,6725 10^{-27} Kg ; charge : +e=+1,6 10^{-19} C.

Neutron: découvert par **Chadwick** en 1932, particule très instable à l'état libre. Hors du noyau il se désintègre spontanément.
Masse: 1,6748 10^{-27} Kg ; charge nulle.

En plus des particules élémentaires, le proton et le neutron, on retrouve d autre particule, tel que:

Le positon β^+: découvert par Anderson en 1933, de durée de vie très brève, de masse m et de charge +e.

Le négaton β^-: particule stable de même masse et même charge que celle de l électron.

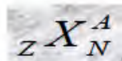
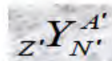
Le neutrino et l'anti neutrino : leur mise en évidence est acquise aujourd hui. Particule de charges nulle et de masse nettement inferieur à celle de l électron.

L'antiproton découvert en 1955: particule instable, obtenu en bombardant des protons ou des neutrons par protons d énergie considérable.

L'antineutron découvert en 1956: cette particule instable résulte d un processus d échange de charge entre le proton et l antiproton. Il diffère du neutron par son moment magnétique.

Les mésons : de durée de vie très brèves ont été découvertes par Powell en 1948 de masse au repos 275 m et de charge ±e.

1.1.2. Nomenclature.

1.1.2.1 isobares: deux noyaux sont dit isobares s'ils ont le même nombre de nucléons (même A; A = A').

1.1.2.2 isotopes: deux noyaux sont dit isotopes s'ils ont le même nombre de protons (même Z; Z = Z').

1.1.2.3 isotones: deux noyaux sont dit isotones s'ils ont le même nombre de neutrons (même N; N = N').

1.1.2.4 isomères: deux noyaux sont dit isomères s'ils diffèrent par leur niveau énergétique (même A et même Z).

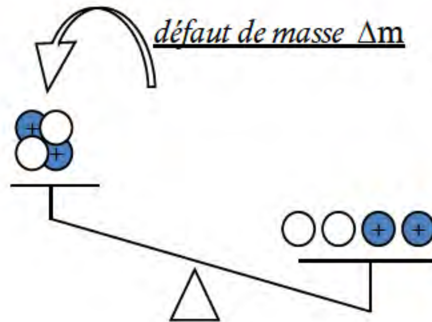
Quelques exemples

- **Hydrogène** $^{1}_{1}H$ **1 proton, 0 neutron**
- **Deutérium** $^{2}_{1}H$ **1 proton, 1 neutron**
- **Tritium** $^{3}_{1}H$ **1 proton, 2 neutrons**
- **Carbone** $^{12}_{6}C$, $^{13}_{6}C$ **6 protons, 6 ou 7 neutrons**
- **Uranium-235** $^{235}_{92}U$ **soit 235 – 92 = 143 neutrons**



1.2 Énergie de liaison. est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour le dissocier en ses nucléons.

1.2.1 défaut de masse. Le défaut de masse, noté **Δm**, est la différence entre la somme des masses de tous les nucléons d'un noyau (masses des *Z* protons + masse des N neutrons) et la masse de ce même noyau ***m(A,Z)***.



$$\Delta m(A,Z) = Z \times m_p + N \times m_n - m(A,Z).$$

1.2.2 Énergie de liaison. Le défaut de masse Δm se retrouve sous forme d'énergie de liaison El du noyau. D'après le principe de l'équivalence masse **énergie-d'Einstein.**

$$El(A,Z) = \Delta m(A,Z) \times C^2$$

$$El_{moy}(A,Z) = \frac{El(A,Z)}{A}$$

2. Stabilité et instabilité du noyau : la radioactivité

2.1 forces mises enjeux dans le noyau.

Les deux interactions les plus intenses, entre nucléons dans le noyau atomique sont :

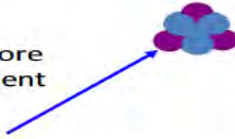
- **l'interaction électrique ou coulombienne** : elle existe uniquement entre les protons ; elle est **répulsive** car les protons sont chargés positivement;

- **l'interaction forte:**, interaction à très courte portée, entre les nucléons (protons ou neutrons); elle est **attractive** et, à distance égale (de l'ordre du fermi). Elle est beaucoup plus intense que l'interaction coulombienne ; l'interaction forte assure la cohésion du noyau.

Remarque : à distance égale, l'interaction gravitationnelle est **négligeable** devant l'interaction coulombienne et l'interaction forte.

Quelle est la force qui assure la cohésion du noyau? → La « *colle* » nucléaire

- Les protons dans le noyau sont soumis à une force de répulsion électrique
- Il doit exister une attraction encore plus forte qui les maintient ensemble
- l'utilité des neutrons est la cohésion des nucléons.



Stabilité nucléaire



2.1 Noyau stable et noyau instable ou radioactif

Un noyau stable est un noyau qui garde indéfiniment la même composition.

Un noyau instable ou radioactif est un noyau qui se désintègre spontanément en donnant un noyau différent et en émettant soit :

- une particule α qui est un noyau d'hélium He (radioactivité α), si le noyau est « lourd » (trop de nucléons) ;
- un électron e^- (radioactivité β^-) si le noyau contient trop de neutrons ;
- un positron e^+ (radioactivité β^+) si le noyau contient trop de protons ;
- et parfois un rayonnement électromagnétique très énergétique appelé rayonnement γ.
- Une capture électronique.

Le noyau qui se désintègre est appelé noyau père et le noyau qui apparaît est appelé noyau fils.

Le phénomène de désintégration de noyaux instables est appelé radioactivité.

2.1.1 L'unité De Masse Atomique

L'**u.m.a** est la masse du **1/12** ème d'un noyau du ^{12}**C**. Elle est plus faible que la masse du proton ou celle du neutron pris isolément.

Par définition, la masse de l'atome neutre de l'isotope ^{12}C du carbone est égale *exactement* à 12 *u*.

	u	kg	MeV / c²
u	1	$1{,}66055 \times 10^{-27}$	931,5
électron	0,0005486	$9{,}10953 \times 10^{-31}$	0,511003
proton	1,007276	$1{,}67265 \times 10^{-27}$	938,280
neutron	1,008665	$1{,}67496 \times 10^{-27}$	939,573

$E = mc^2$ $m = E / c^2$ en MeV / c^2 , unité qui permet de connaître directement l'énergie associée à une particule

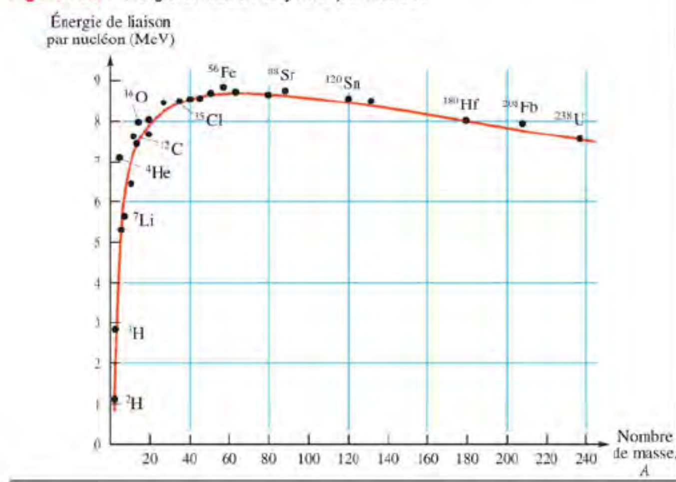
2.1.2 Calcul de l'unité de masse atomique

• différencier nombre de masse (nombre de nucléons) et masse exacte (masse atomique) • choix d'une unité de masse mieux adaptée que le kg (SI) : unité de masse atomique *u*	par définition $1u = 1/12$ de l'atome de ^{12}C

Donc la masse exacte du $^{12}C = 12,000000\,u$, et 1 mole d'atomes de ^{12}C a, par définition, une masse de 0,012 kg , elle contient $6,022 \times 10^{23}$ atomes de carbone

$$1u = \frac{1 \times 12 \times 10^{-3}}{12 \times 6,022 \times 10^{23}} = 1,66055 \times 10^{-27}\ kg$$

Énergie de liaison par nucléons



3.Équations des désintégrations radioactives

3.1 Réactions nucléaires: La radioactivité est une transformation spontanée qui affecte le noyau de l'atome : c'est une réaction nucléaire.

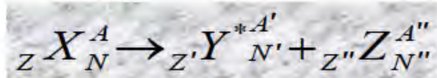
3.2 Lois de conservation

Une réaction nucléaire et en particulier une désintégration radioactive. Elle obéit aux deux lois de conservations suivantes appelées également lois de Soddy :

3.2.1 loi de conservation de la charge électrique:

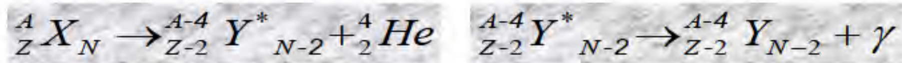
pour une désintégration radioactive, la charge électrique du noyau père est égale à la somme de la charge électrique du noyau fils et de celle de la particule émise.

3.2.2 loi de conservation du nombre total de nucléons : pour une désintégration radioactive, le nombre de nucléons du noyau père est égale à la somme du nombre de nucléons du noyau fils et de celui la particule émise.



$${}_{Z}X_{N}^{A} \rightarrow {}_{Z'}Y_{N'}^{*A'} + {}_{Z''}Z_{N''}^{A''}$$

Conservation de la masse: A = A'+A''



$${}_{Z}^{A}X_{N} \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y^{*}_{N-2} + {}_{2}^{4}He \qquad {}_{Z-2}^{A-4}Y^{*}_{N-2} \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y_{N-2} + \gamma$$

3.3.2 Énergie libérée lors de la désintégration α:

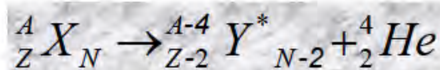
Elle est définie par la différence de masse entre les deux états initial et final.

$$E_{liberee}(A,Z) = \left[m({}_{Z}^{A}X) - (m({}_{Z-2}^{A-4}Y) + m({}_{2}^{4}He))\right] \times C^{2}$$

- L'Énergie libérée lors de la désintégration α se répartit entre l'atome fils **Y**, la particule α et le photon gamma émis.

- Le spectre d'émission (de la particule α) est un spectre d'une seule raie (1 énergie possible).

- La réaction n'est possible que si le noyau père est lourd (A > 200).



$${}_{Z}^{A}X_{N} \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y^{*}_{N-2} + {}_{2}^{4}He$$

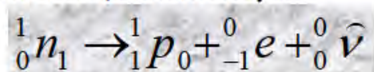
3.4 Désintégration radioactive β^-

3.4.1 Équation de désintégration β^-

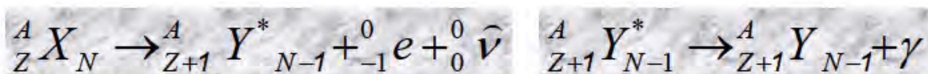
Elle est spécifique aux noyaux possédant trop de neutrons (au-dessus de la vallée de stabilité dans le cas d'un diagramme (Z,N). Il s'agit de l'émission d'un électron.

les noyaux émettant les particules **β^-** recherchent la stabilité en transformant un de leurs **neutrons** en un **proton** en émettant un électron

L'équation d'une désintégration **β^-** s'écrit en deux étapes dans le cas d'une émission de rayonnement **γ** :



$${}_{0}^{1}n_{1} \rightarrow {}_{1}^{1}p_{0} + {}_{-1}^{0}e + {}_{0}^{0}\hat{\nu}$$



$${}_{Z}^{A}X_{N} \rightarrow {}_{Z+1}^{A}Y^{*}_{N-1} + {}_{-1}^{0}e + {}_{0}^{0}\hat{\nu} \qquad {}_{Z+1}^{A}Y^{*}_{N-1} \rightarrow {}_{Z+1}^{A}Y_{N-1} + \gamma$$

3.4.2 Énergie libérée lors de la désintégration β⁻

L'énergie dégagée lors de la transmutation se calcule au moyen de la variation de masse des noyaux:

$$E_{\beta^-} = \left[m({}^A_ZX) - (m({}_{Z+1}^{A}Y) + m_e)\right] \times C^2$$

$$M({}^A_ZX) = m({}^A_ZX) + Z \times m_e$$

$$M({}_{Z+1}^{A}Y) = m({}_{Z+1}^{A}Y) + (z+1)m_e$$

➢ L'énergie libérée se répartit entre l'électron et l'anti-neutrino de manière aléatoire et continue. Le spectre d'émission (β^-) est donc un spectre continu (plusieurs énergies possibles).

➢ Chaque désintégration (β^-) pure est caractérisée par une énergie fixe de décroissance. Du fait que l'énergie cinétique du noyau est négligeable de par sa masse à celle de l'électron et de l'antineutrino réunis, l'énergie dégagée $E_{Libérée}$ est partagée entre les énergies cinétique du (β^-) et de l'antineutrino.

3.4.2 Énergie libérée lors de la désintégration β⁻

L'énergie dégagée lors de la transmutation se calcule au moyen de la variation de masse des noyaux:

$$E_{\beta^-} = \left[m({}^A_ZX) - (m({}_{Z+1}^{A}Y) + m_e)\right] \times C^2$$

$$M({}^A_ZX) = m({}^A_ZX) + Z \times m_e$$

$$M({}_{Z+1}^{A}Y) = m({}_{Z+1}^{A}Y) + (z+1)m_e$$

➢ L'énergie libérée se répartit entre l'électron et l'anti-neutrino de manière aléatoire et continue. Le spectre d'émission (β^-) est donc un spectre continu (plusieurs énergies possibles).

➢ Chaque désintégration (β^-) pure est caractérisée par une énergie fixe de décroissance. Du fait que l'énergie cinétique du noyau est négligeable de par sa masse à celle de l'électron et de l'antineutrino réunis, l'énergie dégagée $E_{L\ bé\ ée}$ est partagée entre les énergies cinétique du (β^-) et de l'antineutrino.

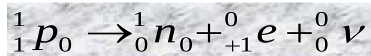
22

3.5 Désintégration β⁺

3.5.1 Équation d'une désintégration β⁺

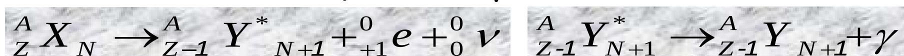
Elle est spécifique aux **noyaux possédant trop de protons (au-dessous de la vallée stabilité dans le cas d'un** diagramme (Z,N). Il s'agit de l'émission d'un positron et d'un neutrino par un noyau riche en protons :

les noyaux émettant des particules **β⁺** recherchent la stabilité en transformant un de leurs **protons** en un **neutron** en émettant un positron et un neutrino.



$${}^1_1p_0 \rightarrow {}^1_0n_0 + {}^0_{+1}e + {}^0_0\nu$$

L'équation d'une désintégration **β⁺** s'écrit en deux étapes dans le cas d'une émission de rayonnement γ :



$${}^A_ZX_N \rightarrow {}^A_{Z-1}Y^*_{N+1} + {}^0_{+1}e + {}^0_0\nu \qquad {}^A_{Z-1}Y^*_{N+1} \rightarrow {}^A_{Z-1}Y_{N+1} + \gamma$$

3.4.2 Énergie libérée lors de la désintégration β⁺

L'énergie dégagée lors de la transmutation se calcule au moyen de la variation de masse des noyaux:

$$E_{\beta^+} = \left[m({}^{A}_{Z}X) - (m({}_{Z-1}^{A}Y) + m_e)\right] \times C^2$$

$$M({}^{A}_{Z}X) = m({}^{A}_{Z}X) + Z \times m_e$$

$$M({}_{Z-1}^{A}Y) = m({}_{Z-1}^{A}Y) + (z-1)m_e$$

- L'énergie dégagée se répartit entre le positron et le neutrino de manière aléatoire et continue. Le spectre d'émission (du positron) est donc un spectre continu.

- Réaction possible si (Mx-My).c² > 1.022 Mev

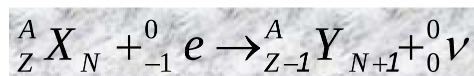
- Le positon émis perd progressivement son énergie par freinage. Il s'annihile alors avec un électron du milieu donnant 2 photons γ de 511 KeV à 180° l'un de l'autre, le spectre photonique est donc composé d'un spectre d'une seule raie.

24

3.6 Désintégration capture électronique (CE).

3.6.1 Équation d'une désintégration capture électronique (CE).

Elle est spécifique aux noyaux possédant trop de protons, Il s'agit de la capture d'un électron du nuage électronique par le noyau selon l'équation suivante:



$${}^{A}_{Z}X_{N} + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + {}^{0}_{0}\nu$$

les noyaux instables peuvent capturer un électron des couches internes, recherchant la stabilité en transformant un de leurs protons en un neutron en émettant un neutrino.

$$E_{CE} = \left[m({}^{A}_{Z}X) + m_e - m({}_{Z-1}^{A}Y)\right] \times C^2$$

$$M({}^{A}_{Z}X) = m({}^{A}_{Z}X) + Z \times m_e$$

$$M({}_{Z-1}^{A}Y) = m({}_{Z-1}^{A}Y) + (z-1)m_e$$

- Réaction en concurrence avec la désintégration β+ si celle-ci est possible.

- Après capture l'atome revient à son état fondamental en émettant un RX ou par émission d'un électron Auger, le spectre photonique est donc un spectre de raies.

26

4. Loi de décroissance radioactive

4.1 Caractéristique d'une désintégration radioactive

Une désintégration radioactive est

- **aléatoire** : il est impossible de prévoir l'instant où va se produire la désintégration d'un noyau radioactif.

- **spontanée :** la désintégration se produit sans aucune intervention extérieure.

- **inéluctable :** un noyau radioactif se désintégrera tôt ou tard.

- **indépendante de la combinaison chimique dont le noyau fait partie et des paramètres extérieurs tels que** pression ou température.

4.2 Activité d'une source radioactive

On appelle activité d'un échantillon radioactif, le nombre moyen de noyaux de l'échantillon qui se désintègrent par seconde.

L'unité internationale d'activité est le becquerel de symbole Bq.

1 Bq = 1 désintégration par seconde

4.2.1 Activité moyenne

L'activité moyenne A_{moy} *d'un échantillon entre les instants de date t et* t + Δt *est définie par l'expression :*

$$A_{moy} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

4.2.2 Activité instantanée

L'activité A(t) *à une date t, appelée* ***activité instantanée est définie comme suit :***

$$A(t) = \lim_{\Delta t \to 0}\left(-\frac{\Delta N}{\Delta t}\right) = -\frac{dN}{dt}$$

$$N(t) = N_0 \times e^{-\lambda \times t}$$

4.3.1 Relation entre l'activité et le nombre de noyaux radioactifs.

L'activité instantanée ***A(t) est liée au nombre moyen N (t) de noyaux radioactifs identiques non désintégrés à la date t*** par la relation :

$$A(t) = \lambda \times N(t)$$

où **λ** est **la constante radioactive caractéristique des noyaux radioactifs.**

4.3.2 Décroissance de l'activité.

L'activité d'une source radioactive décroît suivant une loi analogue à la loi de décroissance radioactive de la population moyenne des noyaux de la source de constante radioactive λ :

$$A(t) = \lambda \times N_0 \times e^{-\lambda \times t} = A_0 \times e^{-\lambda \times t}$$

4.3.2 Décroissance de la masse.

La masse d'une source radioactive décroît suivant une loi analogue à la loi de décroissance radioactive de la population moyenne des noyaux de la source de constante radioactive λ :

$$N(t) = \frac{m(t)}{M} N_A \Rightarrow m(t) = \frac{N(t) \times M}{N_A}$$

$$m(t) = \frac{N_0 \times e^{-\lambda \times t} \times M}{N_A} = m_0 \times e^{-\lambda \times t}$$

4.4 Temps caractéristiques de la loi de décroissance radioactive

4.4.1 La constante de temps.

La constante de temps d'une source radioactive constituée de noyaux identiques est la durée τ au bout de laquelle le nombre de noyaux restants (ou bien l'activité de la source) est divisé par $e^1 = e$.

La constante de temps τ est caractéristique du type de noyau radioactif. On peut montrer, à l'aide de la loi de décroissance radioactive, que :

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

4.4.2 La demi-vie

La demi-vie d'une source radioactive constituée de noyaux identiques est la durée $t_{1/2}$ *au bout de laquelle l'activité* est divisée par 2 ou bien, ce qui est équivalent, le temps au bout duquel le nombre moyen de noyaux restants est divisé par 2. *La demi-vie $t_{1/2}$ est caractéristique du type de noyau radioactif.*

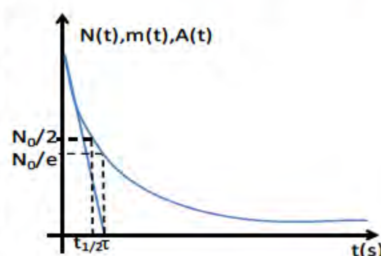
On peut montrer, à l'aide de la loi de décroissance radioactive**, que :**

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \tau \times \ln(2)$$

4.4.3 Allure des courbes de décroissances radioactive *N=f(t) ou A = g(t)*

Les courbes *N = f(t) ou A = g(t), ou m(t)* ***ont la même allure car A et m sont proportionnelles à N. On peut les construire à partir*** de la définition de la demi-vie en s'aidant du tableau ci-après.

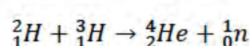
t	0	$t_{1/2}$	$2t_{1/2}$	$3t_{1/2}$	....	$3t_{1/2}$
N(t)	N_0	$N_0/2$	$N_0/2^2$	$N_0/2^3$	....	$N_0/2^n$
A(t)	A_0	$A_0/2$	$A_0/2_2$	$A_0/2_3$	....	$A_0/2_n$
m(t)	m_0	$m_0/2$	$m_0/2^2$	$m_0/2^3$	....	$m_0/2^n$



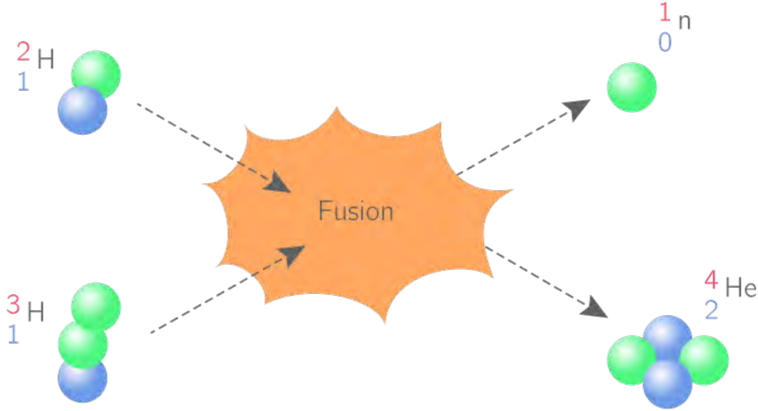
Fusion nucléaire

La fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers fusionnent pour former un noyau plus lourd.

La réaction nucléaire de fusion de deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium est :



$${}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$



Fusion du deutérium et du tritium

Des particules et un rayonnement gamma sont également émis et de l'énergie est libérée. Pour que la fusion se produise, il faut des températures très élevées pour vaincre la répulsion entre les noyaux. Cette réaction est très intéressante pour produire de l'énergie mais, pour l'instant, elle n'est pas suffisamment maîtrisée.

$$E_{liberee} = \Delta m \times C^2$$

Δm est la variation de masse entre l'état initial et l'état final.